第 40 卷　第 2 期
2023 年 4 月

应　用　力　学　学　报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 2
Apr. 2023

文章编号:1000-4939(2023)02-0364-14

压缩条件下玄武岩柱尺寸效应及破裂机理数值模拟研究

王永艺,唐春安,夏英杰

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室,116024 大连)

摘　要:为研究压缩条件下玄武岩柱强度和变形的尺寸效应,及其破裂机理和破坏模式,本研究构建不同尺寸的玄武岩柱图像,然后将细观损伤力学、统计强度理论、连续介质力学相结合,基于 RFPA^{3D}-CT 的数字图像处理,将玄武岩柱图像转化为有限元网格模型,并分别赋予节理、岩石的材料力学参数,其中,考虑节理及岩石的非均质。开展压缩条件下的玄武岩柱数值试验,分析侧压、垂直柱轴方向(Ⅰ/Ⅱ)对玄武岩柱的力学尺寸效应的影响,以及玄武岩柱破裂过程的应力场演化与损伤破裂特征。研究表明:对于垂直柱轴方向Ⅰ的情况,当侧压为 0 MPa,试件抗压强度无明显的尺寸效应;当侧压为 2 MPa,试件抗压强度的尺寸效应临界值为 4 m;当侧压为 4、6、8 MPa,试件抗压强度的尺寸效应临界值为 6 m。对于垂直柱轴方向Ⅱ的情况,当侧压为 0、2 MPa,试件抗压强度无明显的尺寸效应;当侧压为 4 MPa,试件抗压强度的尺寸效应临界值为 4 m;当侧压为 6、8 MPa,试件抗压强度的尺寸效应临界值为 6 m。当侧压为 0 ~ 8 MPa,随着模型尺寸的增加,试件抗压强度的横观各向异性系数变化范围为 0.75 ~ 1.15;试件等效变形模量的横观各向异性系数变化范围为 0.90 ~ 1.15。因此,玄武岩柱可近似为横观各向同性。分析了不同侧压、模型尺寸、垂直柱轴方向(Ⅰ/Ⅱ)条件下玄武岩柱的节理开裂情况、应力集中、裂纹萌生扩展、破碎带形成的全过程,以及声发射特征。

关键词:玄武岩柱;尺寸效应;侧压;破裂机理;数值模拟

中图分类号:TU45　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2023.02.014

Numerical simulation of size effect and fracture mechanism of columnar jointed basalts under compression

WANG Yongyi, TANG Chun'an, XIA Yingjie

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, 116024 Dalian, China)

Abstract: In order to study the size effect of strength and deformation, fracture mechanisms and failure modes of columnar jointed basalts (CJBs) under compression, the images of CJBs with different sizes are constructed, and combined with the meso damage mechanics, statistical strength theory and continuum mechanics, based on the digital image processing of RFPA^{3D}-CT software, the images of CJBs are transformed

收稿日期:2021-04-26　　修回日期:2021-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 42077251;41807269);重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室重大资助项目(No. 2011DA105287-FW201802)

通信作者:夏英杰,副教授。E-mail:xiayingjie@dlut.edu.cn

引用格式:王永艺,唐春安,夏英杰. 压缩条件下玄武岩柱尺寸效应及破裂机理数值模拟研究[J]. 应用力学学报,2023,40(2):364-377.
WANG Yongyi, TANG Chun'an, XIA Yingjie. Numerical simulation of size effect and fracture mechanism of columnar jointed basalts under compression[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(2):364-377.

into finite element mesh models, and the mechanical parameters of joint and rock are given respectively, in which the heterogeneities of joint and rock are considered. Numerical tests of CJBs under compression are carried out to investigated the influences of lateral pressure and the directions (Ⅰ/Ⅱ) on mechanical size effect of CJBs. The stress field evolution and damaged fracture characteristics of CJBs during fracture are also revealed. The results show that for the direction Ⅰ orthogonal to column axis, when the lateral pressure is 0 MPa, the compressive strength (CS) of specimen is without no obvious size effect; when the lateral pressure is 2 MPa, the critical value of CS size effect of specimen is 4 m; when the lateral pressure is 4, 6, 8 MPa, this critical value is 6 m. For the direction Ⅱ orthogonal to column axis, when the lateral pressure is 0 MPa and 2 MPa, the CS of specimen has no apparent size effect; when the lateral pressure is 4 MPa, the critical value of CS size effect of specimen is 4 m; when the lateral pressure is 6 MPa and 8 MPa, this critical value is 6 m. When the lateral pressure is 0 – 8 MPa, with the increase of model size, the variation range of transverse anisotropy coefficient of CS is 0.75 – 1.15; that of equivalent deformation modulus (EDM) is 0.90 – 1.15. Therefore, the CJBs can be approximately transversely isotropic. The whole processes of joint cracking condition, stress concentration, crack initiation and propagation, fracture zone formation and acoustic emission (AE) characteristics of CJBs are analyzed under different lateral pressures, model sizes and the directions (Ⅰ/Ⅱ).

Key words: columnar jointed basalts; size effect; lateral pressure; fracture mechanism; numerical simulation

柱状节理是发育于火山岩中的一种原生张性破裂构造,属于原生节理,它往往将岩体切割成规则或者不规则的棱柱体。由于节理的存在,其岩体具有尺寸效应、各向异性等力学特性。随着西南地区交通设施及水电基地建设的推进,越来越多的特大型岩体工程建设都与柱状节理岩体有关,如金沙江下游的溪洛渡水电站和白鹤滩水电站,中游的龙开口水电站和相关的特长交通隧道等。这些柱状节理岩体工程中,岩体一般处于压缩状态[1],因此,研究压缩状态下柱状节理岩体的变形和强度特性,以及探讨柱状节理岩体的破裂机理和破坏模式,对工程岩体相应的处治措施等都有十分重要的实际意义。

柱状节理构造,多见于玄武岩中,有时在中酸性熔岩、熔结凝灰岩、潜火山岩、基性岩脉中也可见到[2]。在国外,学者们对柱状节理岩体的研究,主要侧重于其形成机制,如 TORAMARU 等[3]、BAHR 等[4]、GOEHRING 等[5]、MÜLLER[6-7]、NISHIMOTO[8]、CHRISTENSEN 等[9]。而对于柱状节理岩体的力学特性研究较少,其中,美国能源部曾于 20 世纪 80 年代组织劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)、Itasca 公司以及哥伦比亚大学等,开展玄武岩核废料埋藏过程中柱状节理岩体的大型原位试验,对柱状节理玄武岩变形模量和强度参数进行了评价[10]。

在国内,柱状节理岩体的力学特性方面,已有相关学者开展相关研究。肖维民等[10-11]通过单轴压缩试验和三轴压缩试验得到柱状节理岩体在不同柱体倾角下的变形模量和单轴抗压强度,分析柱状节理岩体变形和强度的各向异性特性。JI 等[12]采用水泥、细砂、水、减水剂,制作柱状节理岩体试件,对其开展单轴压缩试验研究,分析不同柱体倾角情况的试件强度变化及破坏特征。XIA 等[13]提出了一种利用 3DP 和相似常数精确重建不规则柱状节理岩体结构的合适方法,对重建后的试件开展单轴压缩试验,将其试验结果与现场试验结果进行了比较。以上的室内物理试验,在柱状节理岩体力学特性的认识上,取得了有益的研究成果;但当工况及试件较多时,室内物理试验将面临耗时、不经济等问题。在数值模拟方面,崔臻等[14]利用节理网络有限元为工具,研究各结构效应表征参数对柱状节理岩体等效变形模量的影响。郑文棠等[15]采用可变形离散元法建立了柱状节理玄武岩体的三维离散元数值模型,通过数值模拟不同尺寸的承压板试验,探讨了尺寸效应和各向异性对试验成果的影响。闫东旭等[16]建立了柱状节理岩体三维离散元模型,对柱状节理岩体进行了三轴压缩试验数值模拟,研究柱状节理岩体宏观等效弹性模量尺寸效应。以上的数值模拟,对柱状节理岩体的尺寸效应及各向异性取得了有益的进展;但尚未考虑不同侧压对柱状节理岩体力学尺寸效应、破裂机理以及声发射特征的影响。

玄武岩柱的力学尺寸效应可能与侧压、垂直柱

轴方向(Ⅰ/Ⅱ)、平行柱轴方向(柱体倾角)、柱体直径、柱体不规则程度、横向节理的错距比、节理力学性质的变化、岩石细观本构的变化、模型边界条件等因素相关。其中,岩石细观本构方面,在数值试验方法 RFPA^{3D}-CT 中,当岩石残余强度系数取值(0.1 ~ 1)越大时,岩石脆性越弱。在实际工程中,当侧压增加,岩体的脆性有可能随之减弱,延性(或塑性程度)增加。因此,本研究将岩石残余强度系数提升至 0.5,然后仅改变侧压的大小,以研究不同侧压条件下玄武岩柱的力学特性,其研究成果可供对比参考。

本研究构建不同尺寸的玄武岩柱图像,然后将细观损伤力学、统计强度理论、连续介质力学相结合,基于 RFPA^{3D}-CT 的数字图像处理,将玄武岩柱图像转化为有限元网格模型,并分别赋予节理、岩石的材料力学参数,其中,考虑节理及岩石的非均质。进一步开展不同侧压、垂直柱轴方向条件下的玄武岩柱数值试验,以研究其强度和变形的尺寸效应,破裂机理和声发射特征。

1 数值模型

1.1 RFPA^{3D}-CT 原理简介

RFPA^{3D}-CT 是一个三维岩石破裂过程分析程序,可以将数字图像转化为有限元网格模型,其原理如下。为构建数值模型,需要将图片中的信息转换为建模所需的矢量化数据。数字图像是由正方形像素点组成的,如图 1(a)所示,在三维空间中,若认为图像具有一定的厚度,则可将每一个像素点看作一个有限元网格。将各个像素点的角点坐标转换为相应的矢量空间物理位置(其中每个像素点具有相应的厚度和边长),并根据像素点灰度值不同,将其归类为节理及岩石,赋予相应的材料参数。根据上述原理,转化后的有限元网格模型如图 1(b)所示。模型中细观单元的弹性模量和强度分布服从某种统计分布(如 Weibull 分布等),即相邻网格之间的参数不一定相等。通过这种方式,模拟了岩体的非均质性。RFPA^{3D}-CT 基于细观损伤力学和统计强度理论。细观单元采用最大拉应力准则和 Mohr-Coulomb 破坏准则。当细观单元的最小主应力超过其单轴抗拉强度时单元产生拉伸损伤,如图 2(a)所示;如果细观单元应力状态满足 Mohr-Coulomb 破坏准则时,细观单元产生剪切损伤,如图 2(b)所示。细观单元承载能力随损伤演化过程而降低,在达到破坏准则之后仍保持一定的残余强度。有关 RFPA^{3D}-CT 详细的原理可参见相关文献[17-20]。

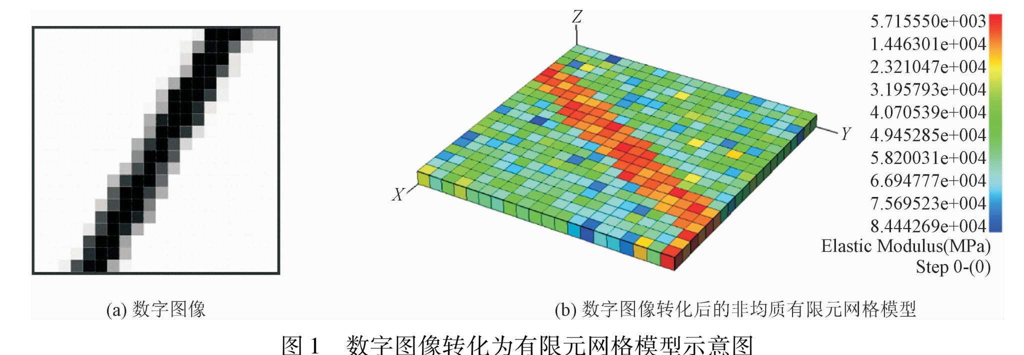


图 1 数字图像转化为有限元网格模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transforming digital image into finite element mesh model

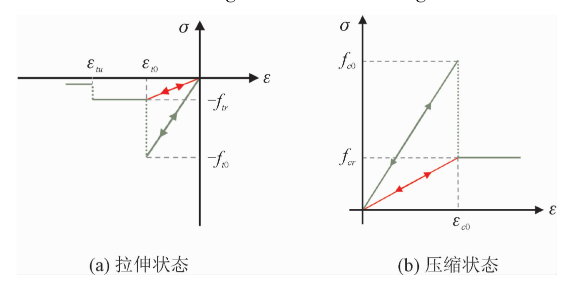


图 2 单轴应力下单元的弹脆性损伤本构关系

Fig. 2 Elastic brittle damage constitutive relation of element under uniaxial stress

1.2 数值模拟验证

数值模拟验证环节,采用肖维民等[10]、JI 等[12]的室内物理试验对本研究采用的数值方法进行验证。数值验证中的数值试件宽度为 50 mm,高度为 100 mm;试件内部的正六棱柱体的外接圆直径是 10 mm;模型边界条件为平面应变情况;考虑了垂直柱轴方向Ⅰ、垂直柱轴方向Ⅱ两种情况;基于 RFPA^{3D}-CT,将数字图像转化为有限元模型,力学参数取值见

表 1,其参考了玄武岩柱的相关文献资料[2,10-16]。数值试验采用位移控制加载,加载量为 0.005 mm/step,直到试件破坏。数值试验与室内物理试验的试件破坏模式对比,如图 3 所示。由图 3(a)和图 3(c)可见,在垂直柱轴方向Ⅰ,数值试验结果能较好地反映 JI 等[12]的物理试验结果(柱体间的竖向节理开裂),且本节数值试验表明,节理开裂后,损伤主要趋向于柱体截面中央。

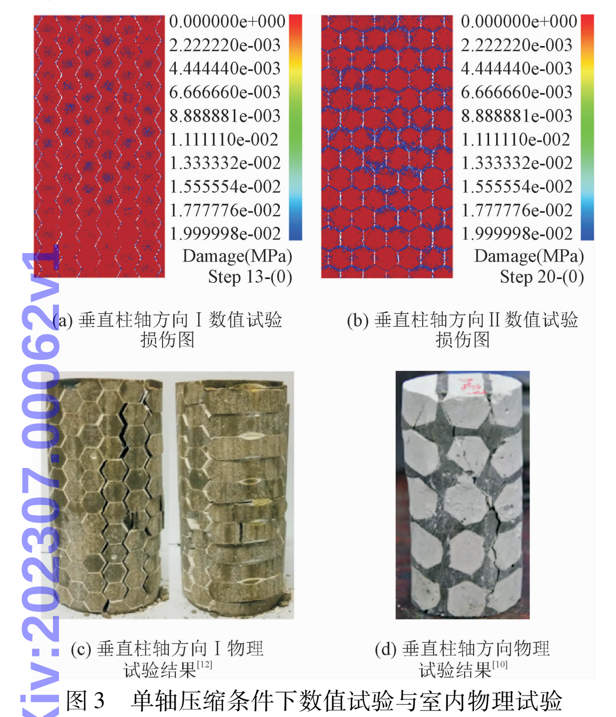


图 3　单轴压缩条件下数值试验与室内物理试验的试件破坏模式对比

Fig. 3　Comparison of specimen failure modes between numerical test and physical test under uniaxial compression

由图 3(b)和图 3(d)可见,在垂直柱轴方向Ⅱ,本节亦展示了试件的损伤图(竖向节理开裂,斜向节理损伤),与肖维民等[10]采用的物理试验结果存在区别,这可能是由于肖维民等[10]采用的物理试验方法,在制作试件时不方便调整各个柱体的方向,以及试件材料等因素,因而其物理试验结果与本节数值试验结果存在一定差异。

表 1　玄武岩柱的岩石及节理的力学参数取值

Tab. 1　The mechanical parameters of columnar jointed basalts (CJBs)

材料类型	均质度	弹模/GPa	单轴抗压强度/MPa	泊松比	摩擦角/(°)	压拉比	残余强度系数
岩石	5	60	120	0.2	56.15	10	0.5
节理	5	15	30	0.25	36	10	1

1.3　数值模型设置

数值试验中,模型尺寸方面,考虑 0.5 m×0.5 m、1 m×1 m、2 m×2 m、3 m×3 m、4 m×4 m、6 m×6 m、8 m×8 m 的情况,柱体直径 20 cm。各个模型的单元尺寸是相同的,其中以 2 m×2 m 试件为例,该试件的单元数为 270 400。图 4 展示了玄武岩柱试件的典型设置和模型边界条件(在试件厚度方向的两面设置位移约束)。考虑垂直柱轴方向Ⅰ和垂直柱轴方向Ⅱ两种情况,以研究力学横观各向异性的程度;玄武岩柱数字图像转化为非均质有限元网格的原理,可见 1.1 节。

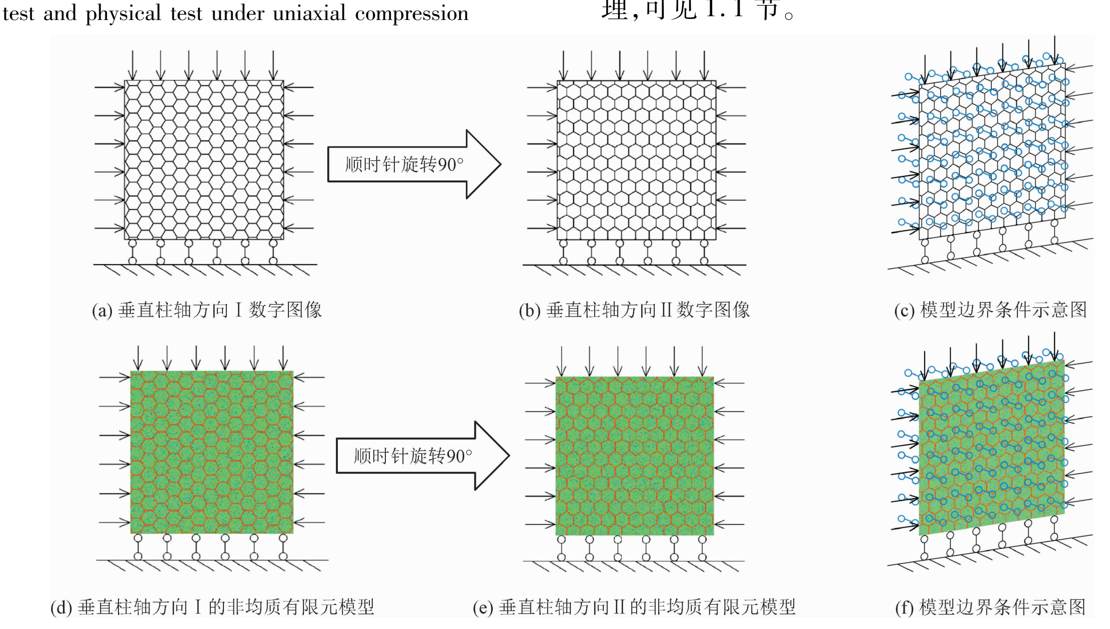


图 4　侧压条件下玄武岩柱试件的典型设置和模型边界条件(以 2 m×2 m 试件为例)

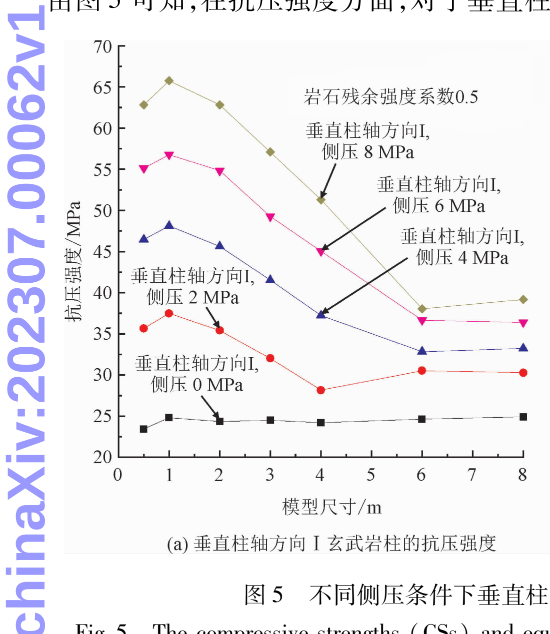
Fig. 4　Typical setting and model boundary condition of CJBs specimen under lateral pressure (2 m×2 m as an example)

玄武岩柱的岩石及节理的力学参数取值，如表 1 所示，其中，考虑岩石及节理的非均匀性（假设服从 Weibull 分布，然后均质度取 5），试件的局部放大图可参考图 1（b）。在每一个模型的顶部施加竖向位移荷载；每一步施加的位移量，与模型初始侧向边长的比值，为 0.000 017；逐步施加位移荷载，直至试件破坏。

2　结果和分析

2.1　不同侧压条件下玄武岩柱的强度及变形的尺寸效应

由图 5 可知，在抗压强度方面，对于垂直柱轴方向Ⅰ的情况，当侧压为 0 MPa，玄武岩柱试件的抗压强度随着试件尺寸的增加呈平缓变化的趋势，试件抗压强度无明显的尺寸效应；当侧压为 2、4、6、8 MPa，试件的抗压强度呈先微增然后减小再缓变的趋势，其中，当侧压为 2 MPa，试件抗压强度的尺寸效应临界值为 4 m，当侧压为 4、6、8 MPa，试件抗压强度的尺寸效应临界值为 6 m。在等效变形模量方面，当侧压为 0 MPa，玄武岩柱试件的等效变形模量随着试件尺寸的增加呈增加-缓变-增加-微减的趋势；当侧压为 2 MPa，试件的等效变形模量呈先波动变化再增加的趋势；当侧压为 4、6 MPa，试件的等效变形模量呈先增加然后缓减再微增的趋势；当侧压为 8 MPa，试件的等效变形模量呈先增加然后缓变再变化的趋势。



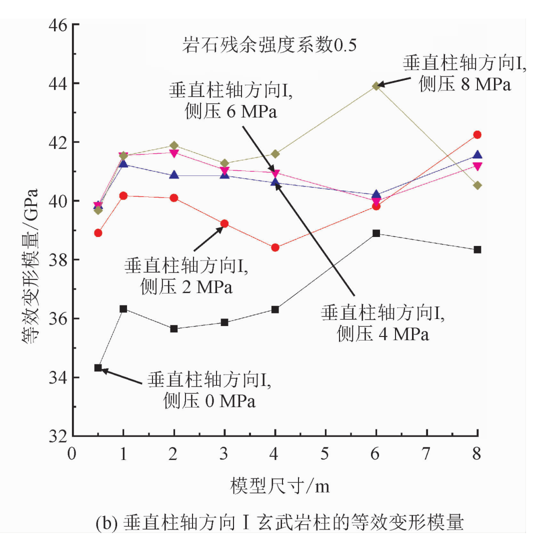


图 5　不同侧压条件下垂直柱轴方向Ⅰ玄武岩柱的抗压强度和等效变形模量

Fig. 5　The compressive strengths (CSs) and equivalent deformation moduli (EDMs) of CJBs along the direction Ⅰ orthogonal to column axis under different lateral pressures

由图 6 可知，在抗压强度方面，对于垂直柱轴方向Ⅱ的情况，当侧压为 0 MPa，玄武岩柱试件的抗压强度随着试件尺寸的增加呈先缓增再缓减的趋势；当侧压为 2 MPa，试件的抗压强度呈先减小再缓变的趋势，试件抗压强度无明显的尺寸效应；当侧压为 4、6、8 MPa，试件的抗压强度呈先减小再缓变的趋势，其中，当侧压为 4 MPa，试件抗压强度的尺寸效应临界值为 4 m；当侧压为 6、8 MPa，试件抗压强度的尺寸效应临界值为 6 m。在等效变形模量方面，当侧压为 0、2 MPa，玄武岩柱试件的等效变形模量随着试件尺寸的增加呈较明显的波动变化-增加的趋势；当侧压为 4、6、8 MPa，试件的等效变形模量呈波动变化的趋势。此外，当侧压超过 6 MPa，侧压的增加对试件等效变形模量的提高已较为有限。

在本研究中，横观各向异性系数定义为垂直柱轴方向Ⅰ的抗压强度（或等效变形模量）除以垂直柱轴方向Ⅱ的抗压强度（或等效变形模量）。由图 7（a）可知，当侧压为 0 ~ 8 MPa，随着模型尺寸的增加，试件抗压强度的横观各向异性系数变化范围为 0.75 ~ 1.15。由图 7（b）可知，当侧压为 0 ~ 8 MPa，随着模型尺寸的增加，试件等效变形模量的横观各向异性系数变化范围为 0.90 ~ 1.15。因此，不同侧压条件下的玄武岩柱强度及变形特性可近似为横观各向同性。

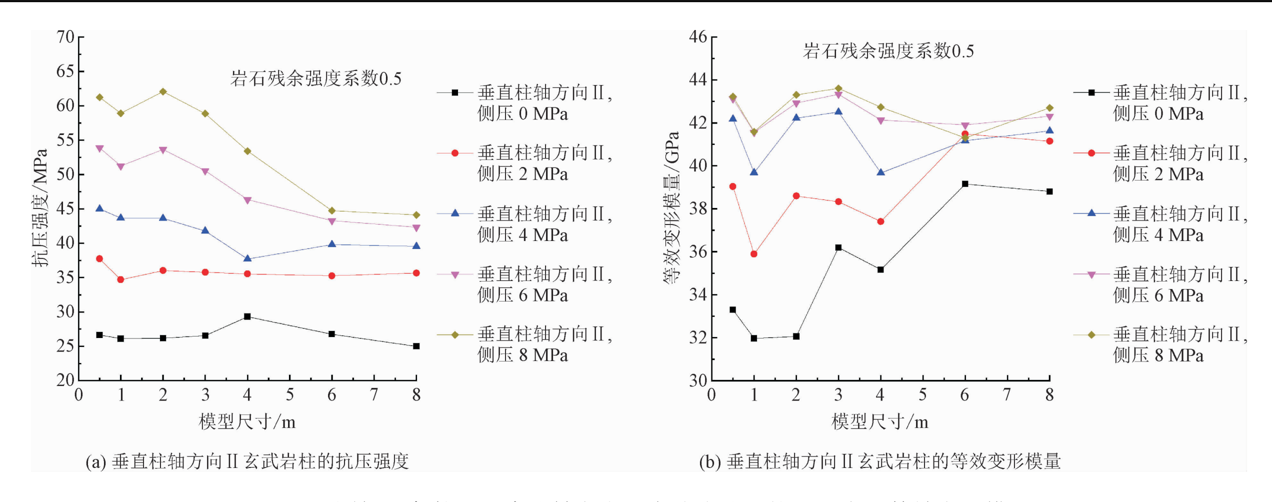


图 6　不同侧压条件下垂直柱轴方向Ⅱ玄武岩柱的抗压强度和等效变形模量

Fig. 6　The CSs and EDMs of CJBs along the direction Ⅱ orthogonal to column axis under different lateral pressures

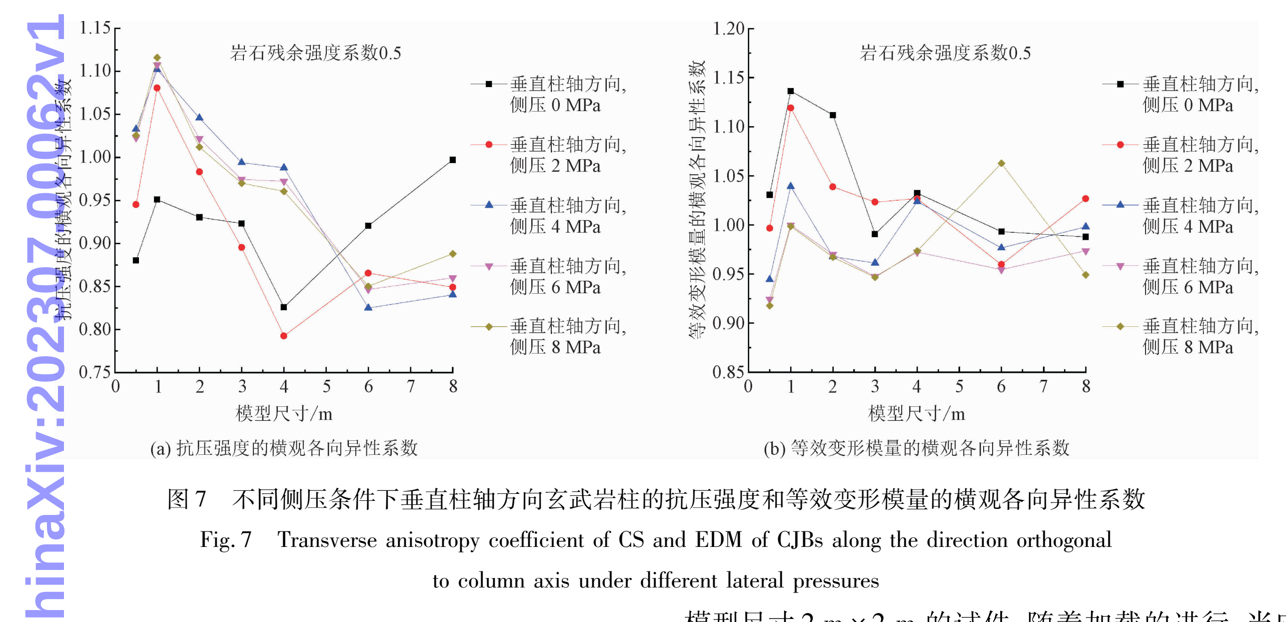


图 7　不同侧压条件下垂直柱轴方向玄武岩柱的抗压强度和等效变形模量的横观各向异性系数

Fig. 7　Transverse anisotropy coefficient of CS and EDM of CJBs along the direction orthogonal to column axis under different lateral pressures

2.2　不同侧压条件下玄武岩柱的应力场演化及声发射特征

2.2.1　尺寸 2 m×2 m 的玄武岩柱试件

由图 8 可知，对于垂直柱轴方向Ⅰ，侧压 0 MPa，模型尺寸 2 m×2 m 的试件，随着加载的进行，当应力达到应力应变曲线的 *A*、*B* 点时，玄武岩柱试件的上部和下部均有应力集中。当应力达到 *C* 点时，试件内的竖向节理开裂，应力集中趋于柱体截面的中央。当继续加载至峰值点附近的 *D* 点时，柱体截面中央的裂纹萌生发育。当应力降至 *E* 点，柱体截面中央的裂纹扩展。当应力继续降至 *F* 点时，柱体内的裂纹扩展到一定程度，应力集中情况减弱。在声发射方面，其声发射呈单峰型分布。

由图 9 可知，对于垂直柱轴方向Ⅰ，侧压 8 MPa，模型尺寸 2 m×2 m 的试件，随着加载的进行，当应力达到应力应变曲线的 *A*、*B* 点时，玄武岩柱试件的竖向节理的应力集中情况较微弱。当应力达到峰值点附近的 *C* 点时，试件内零星柱体截面中央存在应力集中。当应力降至 *D* 点，若干柱体截面中央破裂萌生、扩展。当应力进一步降至 *E* 点，试件内的其它柱体也出现裂纹萌生、扩展。当应力继续降至 *F* 点，破裂柱体的破碎加剧，此时几乎无其它柱体发生破裂。整体来看，试件内的破碎区域呈波动型条带状。在声发射方面，其声发射有双峰型分布的趋势，但其中第一个峰型较不明显。此外，与垂直柱轴方向Ⅰ，侧压 0 MPa，2 m×2 m 试件的情况相比，侧压 8 MPa 能抑制竖向节理的开裂及柱体的拉破裂，提高试件的承载能力，试件的破碎特征表现为波动型条带状破碎。

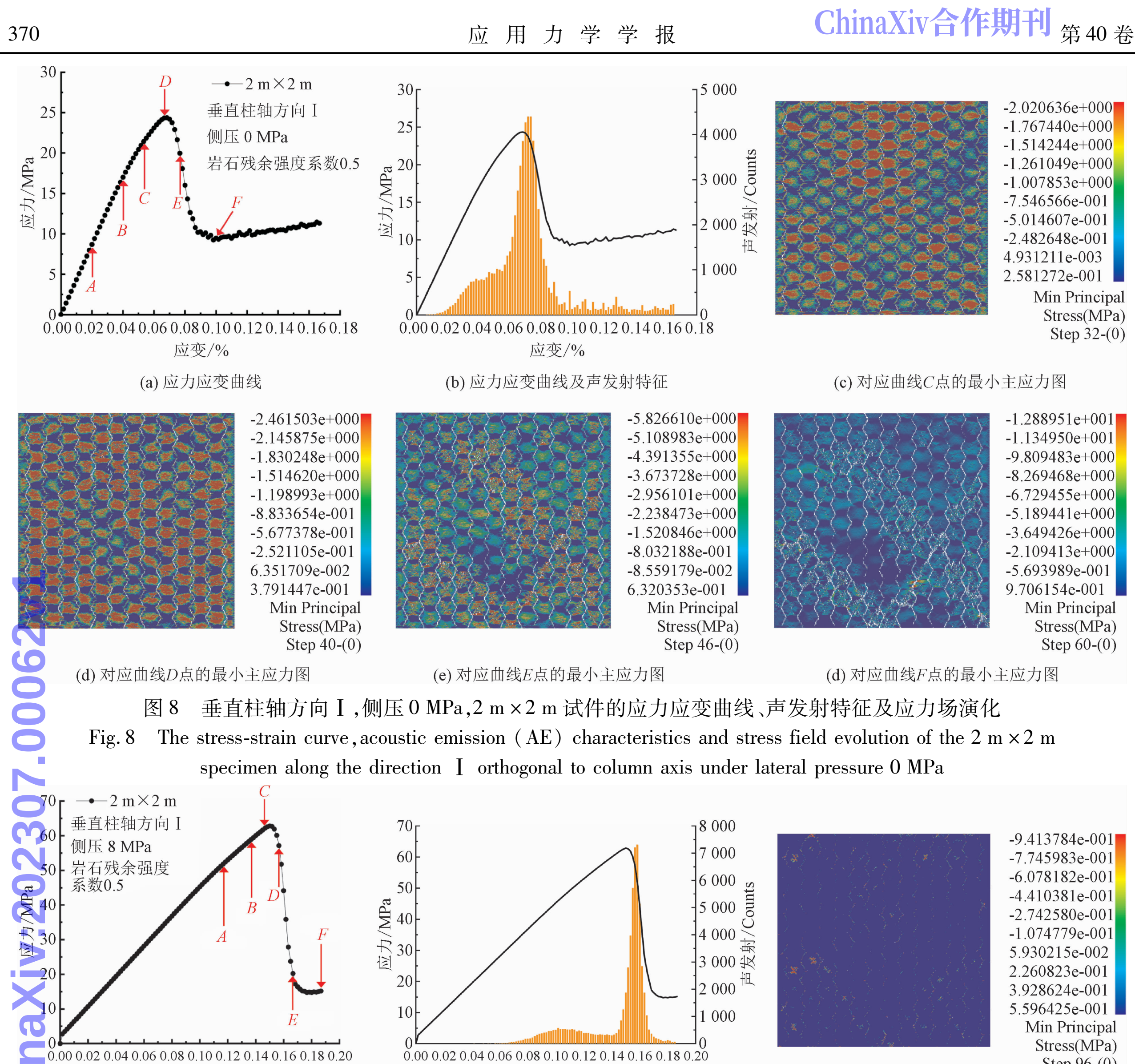


图 8 垂直柱轴方向 Ⅰ，侧压 0 MPa，2 m×2 m 试件的应力应变曲线、声发射特征及应力场演化

Fig. 8 The stress-strain curve, acoustic emission (AE) characteristics and stress field evolution of the 2 m×2 m specimen along the direction Ⅰ orthogonal to column axis under lateral pressure 0 MPa

图 9 垂直柱轴方向 Ⅰ，侧压 8 MPa，2 m×2 m 试件的应力应变曲线、声发射特征及应力场演化

Fig. 9 The stress-strain curve, AE characteristics and stress field evolution of the 2 m×2 m specimen along the direction Ⅰ orthogonal to column axis under lateral pressure 8 MPa

由图 10 可知，对于垂直柱轴方向 Ⅱ，侧压 0 MPa，模型尺寸 2 m×2 m 的试件，随着加载的进行，当应力达到应力应变曲线的 A 点时，玄武岩柱试件内的竖向节理存在应力集中。当应力加载至 B 点时，试件上部中间的竖向节理开裂，应力集中转移至附近的斜向节理，而试件内其它的竖向节理，仍存在应力集中情况。当继续加载至 C 点时，试件内大部分竖向节理已开裂，应力集中已转移至试件内的斜向节理。当应力达到峰值点附近的 D 点时，试件内的斜向节理附近，裂纹萌生发育。当应力降至 E 点，

斜向节理附近，裂纹扩展。当应力继续降至 F 点，裂纹扩展到一定程度，试件内的应力集中情况减弱。在声发射方面，其声发射呈双峰型分布。此外，与垂直柱轴方向Ⅰ，侧压 0 MPa，2 m×2 m 试件的情况相比，垂直柱轴方向Ⅱ的试件，其破裂机理区别在于，竖向节理开裂后，应力集中主要出现在斜向节理，破裂从斜向节理附近发展。由图 11 可知，对于垂直柱轴方向Ⅱ，侧压 8 MPa，模型尺寸 2 m×2 m 的试件，随着加载的进行，当应力达到应力应变曲线的 A 点时，试件内没有明显的应力集中情况。

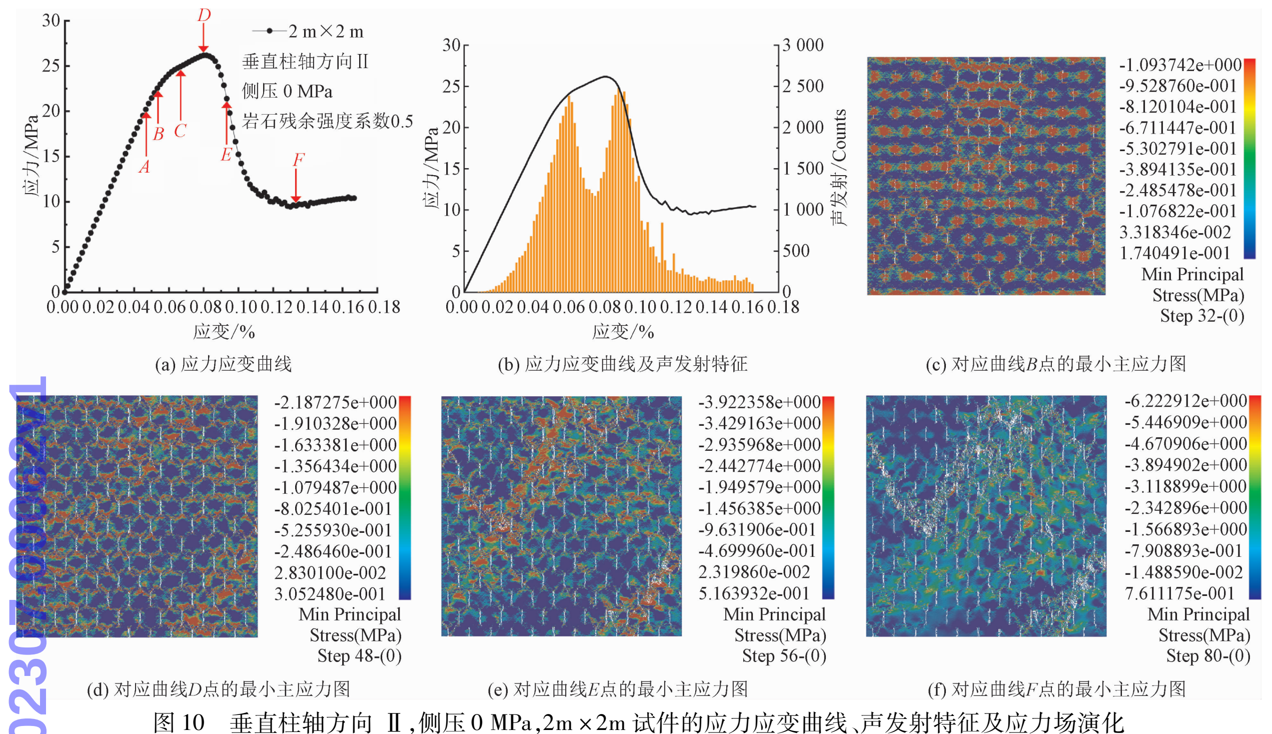


图 10　垂直柱轴方向 Ⅱ，侧压 0 MPa，2m×2m 试件的应力应变曲线、声发射特征及应力场演化

Fig. 10　The stress-strain curve, AE characteristics and stress field evolution of the 2 m×2 m specimen along the direction Ⅱ orthogonal to column axis under lateral pressure 0 MPa

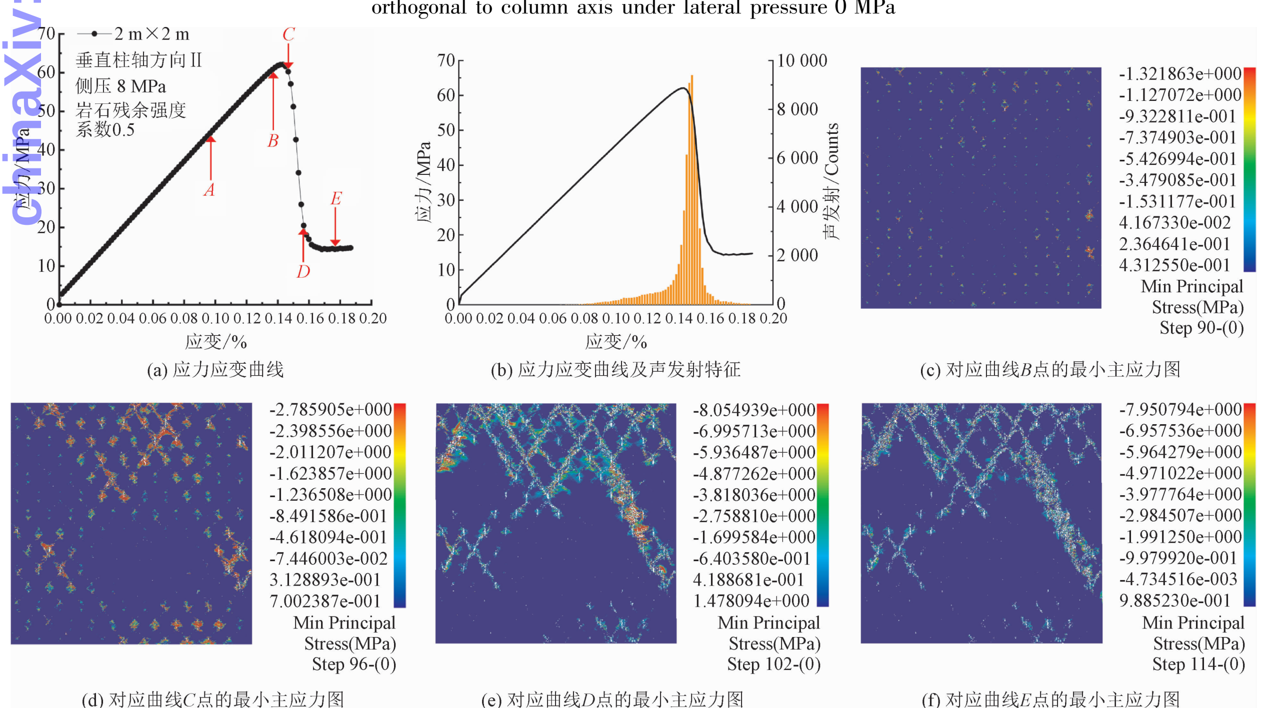


图 11　垂直柱轴方向 Ⅱ，侧压 8 MPa，2 m×2 m 试件的应力应变曲线、声发射特征及应力场演化

Fig. 11　The stress-strain curve, AE characteristics and stress field evolution of the 2 m×2 m specimen along the direction Ⅱ orthogonal to column axis under lateral pressure 8 MPa

当应力加载至 B 点,试件内若干竖向节理有微弱的应力集中趋势。当应力达到峰值点附近的 C 点时,试件内若干竖向节理开裂,零星的斜向节理处应力集中,裂纹萌生发育。当应力降至 D 点,裂纹扩展。当应力继续降至 E 点,裂纹扩展到一定程度,试件内的应力集中情况减弱。在声发射方面,其声发射呈单峰型分布。此外,与垂直柱轴方向Ⅱ,侧压 0 MPa,2 m×2 m 试件的情况相比,侧压 8 MPa 能抑制试件内大部分竖向节理的开裂及柱体的拉破裂,减少应力集中的分布范围,试件的承载能力增加。

2.2.2 尺寸 4 m×4 m 的玄武岩柱试件

由图 12 可知,对于垂直柱轴方向Ⅰ,侧压 0 MPa,模型尺寸 4 m×4 m 的试件,随着加载的进行,当应力达到应力应变曲线的 A 点时,应力集中主要出现在试件的中上部,以及下部的左右两侧。当应力加载至 B、C 点,试件上部的竖向节理开裂,应力集中转移至试件上部的柱体截面中央。当应力达到峰值点附近的 D 点时,试件上部的柱体截面中央,裂纹萌生发育。当应力降至 E 点,裂纹扩展。当应力继续降至 F 点,裂纹扩展到一定程度,试件内的应力集中情况减弱。在声发射方面,其声发射呈双峰型分布。此外,与垂直柱轴方向Ⅰ,侧压 0 MPa,2 m×2 m 试件的情况相比,4 m×4 m 试件,其破裂机理的区别在于,竖向节理的开裂及之后的应力集中,主要发生于试件的上部。与小尺寸试件相比,大尺寸试件包含的柱体较多,在压缩条件下柱体破裂,其应力传递发生变化。

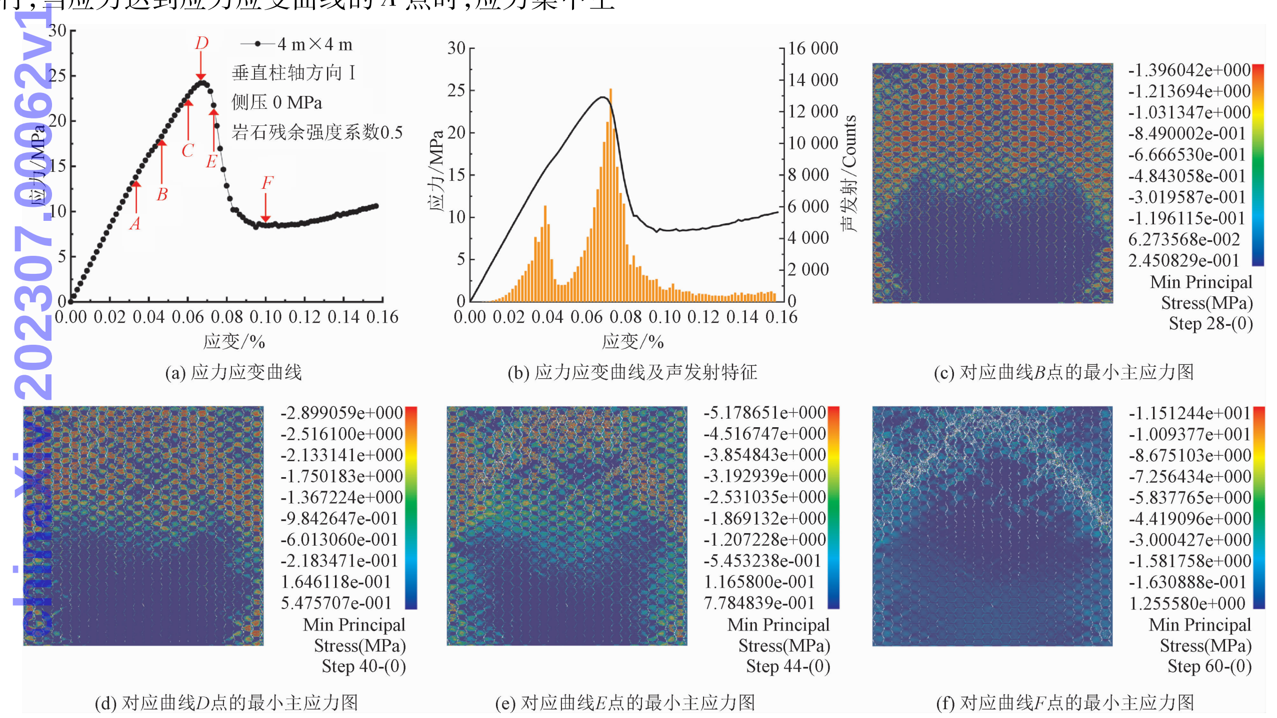


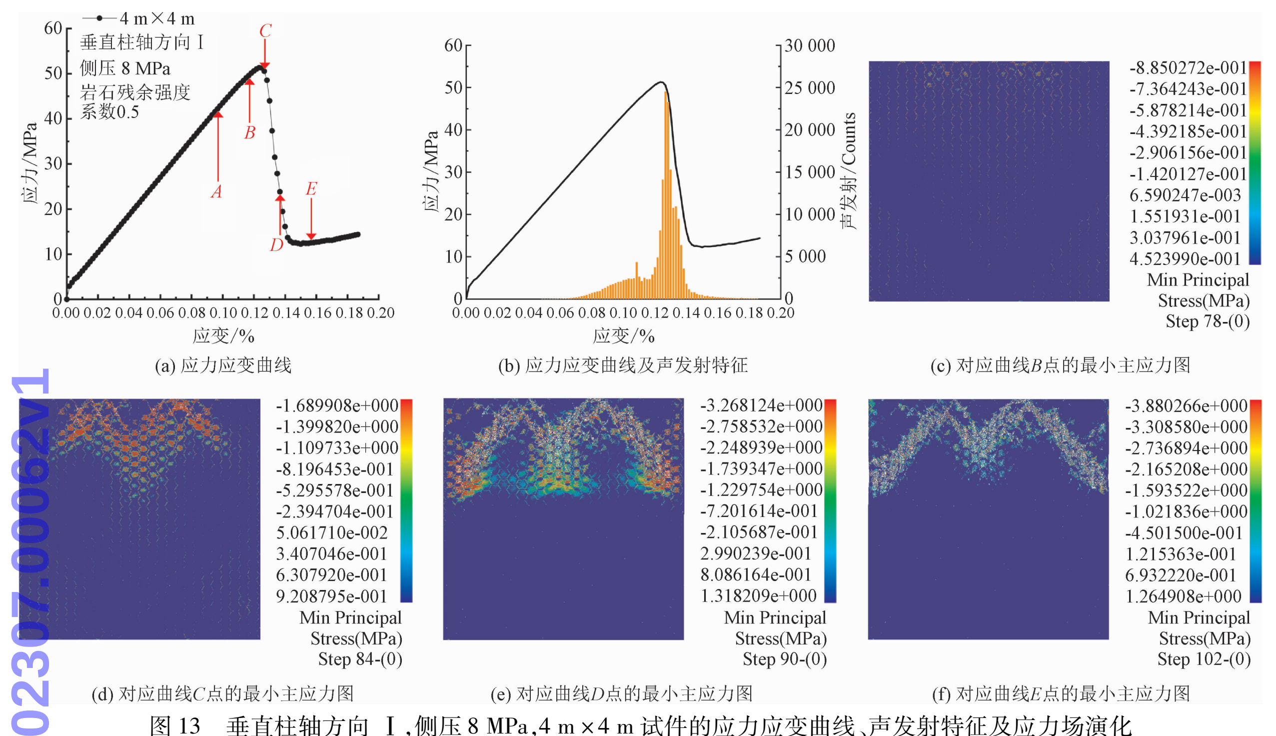
图 12 垂直柱轴方向Ⅰ,侧压 0 MPa,4 m×4 m 试件的应力应变曲线、声发射特征及应力场演化

Fig. 12 The stress-strain curve, AE characteristics and stress field evolution of the 4 m×4 m specimen along the direction Ⅰ orthogonal to column axis under lateral pressure 0 MPa

由图 13 可知,对于垂直柱轴方向Ⅰ,侧压 8 MPa,模型尺寸 4 m×4 m 的试件,随着加载的进行,当应力达到应力应变曲线的 A 点时,试件顶部的竖向节理有微弱的应力集中。当应力加载至 B 点,试件顶部的若干柱体截面中央,有微弱的应力集中。当应力达到峰值点附近的 C 点时,试件顶部较多柱体应力集中,裂纹萌生发育。当应力降至 D 点,试件上部的柱体破裂。当应力继续降至 E 点,试件上部的破碎加剧。整体来看,试件上部的破碎区域,呈波动型条带状分布。在声发射方面,其声发射呈单峰型分布。此外,与垂直柱轴方向Ⅰ,侧压 0 MPa,4 m×4 m试件的情况相比,侧压 8 MPa 能够抑制试件上部的竖向节理开裂,试件的条带状破碎特征更明显。

由图 14 可知,对于垂直柱轴方向Ⅱ,侧压 0 MPa,模型尺寸 4 m×4 m 的试件,随着加载的进行,当应力达到应力应变曲线的 A 点时,在试件中上部,以及试件下部的左右两侧,应力集中较明显。当应力加载至 B 点,试件上部较多竖向节理开裂,试件上部的应力集中转移至斜向节理。继续加载至 C 点,试件上部大部分竖向节理开裂。当应力达到峰值点附近的 D 点

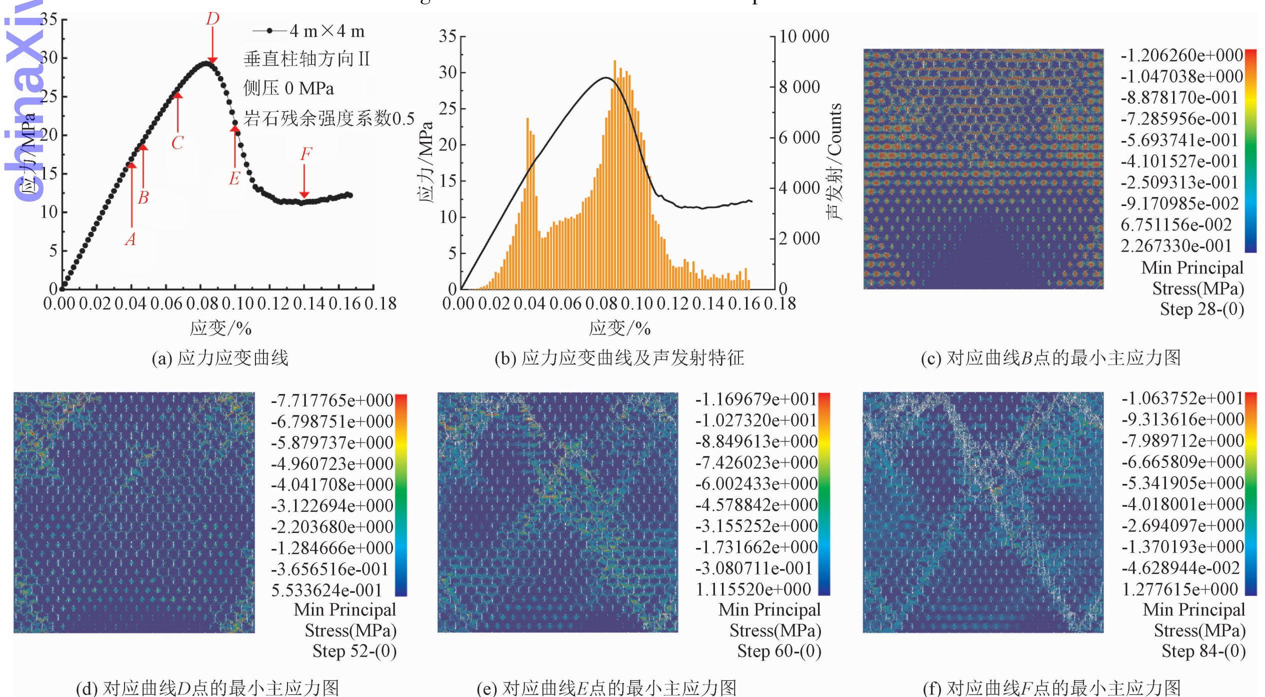
时，试件内更多竖向节理发生开裂，且试件顶部左右两侧的柱体，裂纹萌生发育。当应力降至 E 点，试件顶部左右两侧，以及试件中部，裂纹萌生、扩展。当应力继续降至 F 点，试件内的柱体，破碎加剧，其中，存在一条大致贯穿试件上下部的斜向破碎带。在声发射方面，其声发射呈双峰型分布。此外，与垂直柱轴方向Ⅰ，侧压 0 MPa，4 m × 4 m 试件的情况相比，垂直柱轴方向Ⅱ的试件，其竖向节理开裂之后，应力集中出现在试件的斜向节理和竖向节理（而非柱体截面中央），然后试件内的裂纹萌生扩展，逐渐形成破碎带。



(a) 应力应变曲线　(b) 应力应变曲线及声发射特征　(c) 对应曲线B点的最小主应力图
(d) 对应曲线C点的最小主应力图　(e) 对应曲线D点的最小主应力图　(f) 对应曲线E点的最小主应力图

图 13　垂直柱轴方向 Ⅰ，侧压 8 MPa，4 m × 4 m 试件的应力应变曲线、声发射特征及应力场演化

Fig. 13　The stress-strain curve, AE characteristics and stress field evolution of the 4 m × 4 m specimen along the direction Ⅰ orthogonal to column axis under lateral pressure 8 MPa

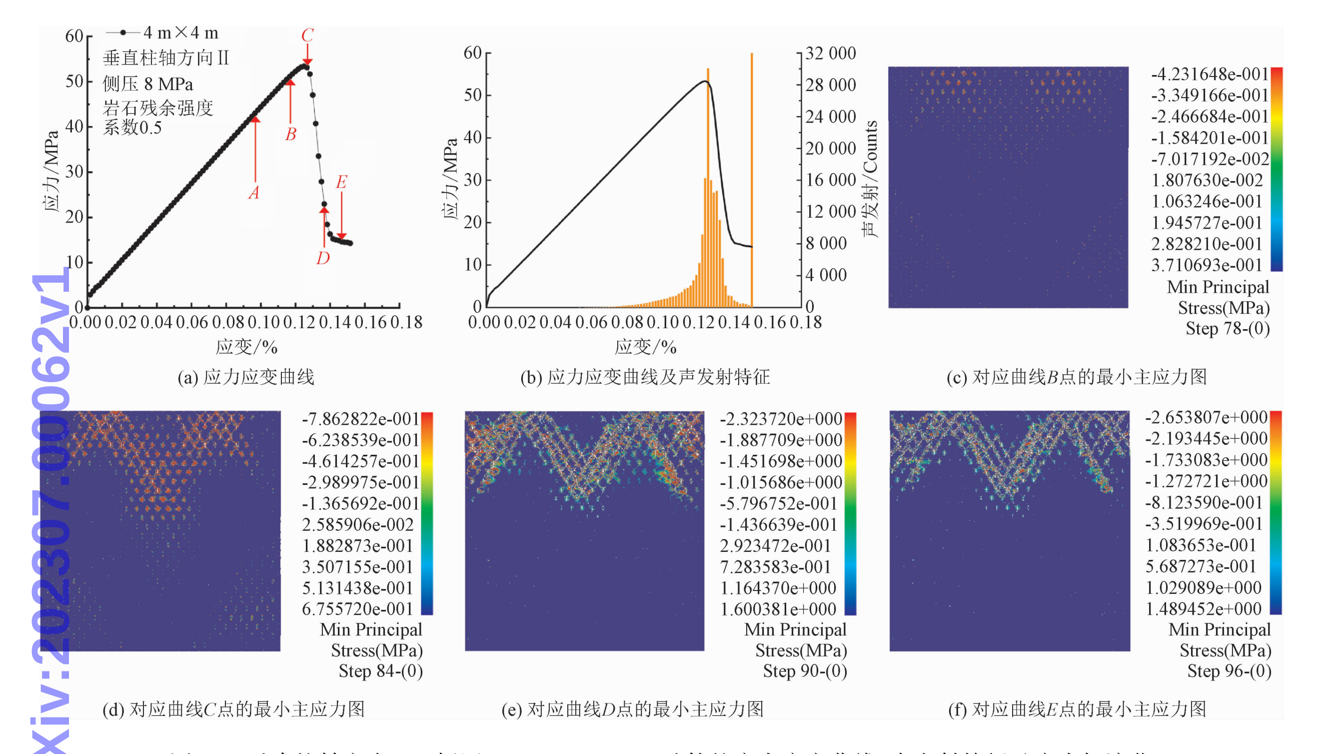


(a) 应力应变曲线　(b) 应力应变曲线及声发射特征　(c) 对应曲线B点的最小主应力图
(d) 对应曲线D点的最小主应力图　(e) 对应曲线E点的最小主应力图　(f) 对应曲线F点的最小主应力图

图 14　垂直柱轴方向 Ⅱ，侧压 0 MPa，4 m × 4 m 试件的应力应变曲线、声发射特征及应力场演化

Fig. 14 The stress-strain curve, AE characteristics and stress field evolution of the 4 m × 4 m specimen along the direction Ⅱ orthogonal to column axis under lateral pressure 0 MPa

由图 15 可知,对于垂直柱轴方向 Ⅱ,侧压 8 MPa,模型尺寸 4 m × 4 m 的试件,随着加载的进行,当应力达到应力应变曲线的 *A* 点时,试件顶部的竖向节理有微弱的应力集中。当应力加载至 *B* 点,试件顶部的竖向节理应力集中逐渐明显。继续加载至峰值点附近的 *C* 点,试件中部的竖向节理亦出现应力集中。当应力降至 *D* 点,原有的应力集中区域,发展为破碎带。当应力继续降至 *E* 点,破碎带的破碎加剧。在声发射方面,其声发射呈单峰型分布。此外,与垂直柱轴方向 Ⅱ,侧压 0 MPa,4 m × 4 m 试件的情况相比,侧压 8 MPa 能抑制试件内竖向节理的开裂,试件破碎特征表现为试件顶部附近的带状破碎,试件承载能力增加。



(a) 应力应变曲线 (b) 应力应变曲线及声发射特征 (c) 对应曲线*B*点的最小主应力图

(d) 对应曲线*C*点的最小主应力图 (e) 对应曲线*D*点的最小主应力图 (f) 对应曲线*E*点的最小主应力图

图 15 垂直柱轴方向 Ⅱ,侧压 8 MPa,4 m × 4 m 试件的应力应变曲线、声发射特征及应力场演化

Fig. 15 The stress-strain curve, AE characteristics and stress field evolution of the 4 m × 4 m specimen along the direction Ⅱ orthogonal to column axis under lateral pressure 8 MPa

2.3 压缩条件下不同尺寸玄武岩柱的损伤破裂特征分析

2.3.1 垂直柱轴方向 Ⅰ,侧压 8 MPa 条件下不同尺寸玄武岩柱的损伤破裂特征分析

图 16 展示了垂直柱轴方向 Ⅰ,侧压 8 MPa,不同尺寸试件的损伤破裂特征,可见其竖向节理发生损伤。此外,当试件尺寸为 0.5 m 时,试件的顶部发生损伤破裂。当试件尺寸为 1 m 时,试件的顶部和底部,有柱体发生损伤破裂,且有一条损伤破碎带连接试件的上下部。当试件尺寸为 2 m 时,试件的顶部和底部,有柱体发生损伤破裂。当试件尺寸为 3、4 m 时,损伤破裂主要发生在试件上部,且损伤破裂区域呈波动型条带状。当试件尺寸为 6、8 m 时,试件上部存在多条倾斜损伤破碎带。

2.3.2 垂直柱轴方向 Ⅱ,侧压 8 MPa 条件下不同尺寸玄武岩柱的损伤破裂特征分析

由图 17 可知,垂直柱轴方向 Ⅱ,侧压 8 MPa,当试件尺寸为 0.5 m 时,水平方向的节理发生损伤,个别竖向节理及其附近损伤破裂。当试件尺寸为 1 m 时,水平方向的节理发生损伤,试件内斜向节理及其附近损伤破裂,并连接形成破碎带。当试件尺寸为 2 m 时,水平方向的节理发生损伤,试件顶部较多斜向节理及其附近损伤破裂,试件底部较少竖向节理及其附近损伤破裂。当试件尺寸为 3 m 时,依然有水平方向的节理发生损伤,损伤破裂主要发生在试件上部。当试件尺寸为 4 m 时,试件下部的水平方向的节理损伤较不明显,试件上部的损伤破裂较明

显，且发生在斜向节理及其附近，损伤破碎带连接。当试件尺寸为 6 m 时，试件上部存在明显的倾斜损伤破碎带。当试件尺寸为 8 m 时，试件内的倾斜损伤破碎带发展至试件中部右侧，并在其附近扩展。

图 16　垂直柱轴方向Ⅰ，侧压 8 MPa，不同尺寸试件损伤破裂特征

Fig. 16　Along the direction Ⅰ orthogonal to column axis, the damaged fracture characteristics of specimens with different sizes under lateral pressure 8 MPa

图 17　垂直柱轴方向Ⅱ，侧压 8 MPa，不同尺寸试件损伤破裂特征

Fig. 17　Along the direction Ⅱ orthogonal to column axis, the damaged fracture characteristics of specimens with different sizes under lateral pressure 8 MPa

3 结 论

1)不同侧压条件下玄武岩柱的尺寸效应。对于垂直柱轴方向Ⅰ的情况,当侧压为0 MPa,试件抗压强度无明显的尺寸效应;当侧压为2 MPa,试件抗压强度的尺寸效应临界值为4 m,当侧压为4、6、8 MPa,试件抗压强度的尺寸效应临界值为6 m。对于垂直柱轴方向Ⅱ的情况,当侧压为0、2 MPa,试件抗压强度无明显的尺寸效应;当侧压为4 MPa,试件抗压强度的尺寸效应临界值为4 m;当侧压为6、8 MPa,试件抗压强度的尺寸效应临界值为6 m。

2)当侧压为0~8 MPa,随着模型尺寸的增加,试件抗压强度的横观各向异性系数变化范围为0.75~1.15;试件等效变形模量的横观各向异性系数变化范围为0.90~1.15。因此,玄武岩柱可近似为横观各向同性。

3)不同侧压条件下垂直柱轴方向Ⅰ的玄武岩柱破裂机理的差异。以垂直柱轴方向Ⅰ的4 m×4 m的玄武岩柱试件为例,当侧压为0 MPa,加载的初始阶段,应力集中主要发生在试件中上部;随着加载的进行,试件上部的竖向节理开裂,附近的柱体截面中央,应力集中;继续加载,试件上部的柱体破碎。与垂直柱轴方向Ⅰ,侧压0 MPa,4 m×4 m试件的情况相比,侧压8 MPa能够抑制试件上部的竖向节理开裂,试件的条带状破碎特征更明显。

4)不同侧压条件下垂直柱轴方向Ⅱ的玄武岩柱破裂机理的差异。以垂直柱轴方向Ⅱ的4 m×4 m的玄武岩柱试件为例,当侧压为0 MPa,加载的初始阶段,应力集中主要发生在试件中上部,以及试件下部的左右两侧;随着加载的进行,竖向节理开裂,斜向节理应力集中;继续加载,产生一条大致贯穿试件上下部的斜向破碎带。与垂直柱轴方向Ⅱ,侧压0 MPa,4 m×4 m试件的情况相比,侧压8 MPa能抑制试件内竖向节理的开裂,试件的破碎特征表现为试件顶部附近带状破碎,试件承载能力增加。

5)本研究中的玄武岩柱试件,其模型边界条件仅考虑在试件厚度方向的两面设置位移约束的情况,尚未考虑其它模型边界条件情况,或者,模型应进一步采用三维模型。此外,玄武岩柱的力学尺寸效应可能与柱体倾角、柱体直径、柱体不规则程度、横向节理的错距比、节理力学性质的变化、岩石细观本构的变化等因素相关。这些将是未来的研究工作方向,本研究亦为后续工作奠定了基础,提供参考。

参考文献:

[1] 刘长明,张红,晏祥智,等.隧道围岩的黏弹塑蠕变模型及参数劣化分析[J].应用力学学报,2020,37(6):2341-2347.
LIU Changming, ZHANG Hong, YAN Xiangzhi, et al. Viscoelastic-plastic creep model and parameter deterioration analysis of tunnel surrounding rock[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(6):2341-2347(in Chinese).

[2] 宁宇,徐卫亚,郑文棠,等.柱状节理岩体随机模拟及其表征单元体尺度研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(6):1202-1208.
NING Yu, XU Weiya, ZHENG Wentang, et al. Study of random simulation of columnar jointed rock mass and its representative elementary volume scale[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(6):1202-1208(in Chinese).

[3] TORAMARU A, MATSUMOTO T. Columnar joint morphology and cooling rate: A starch-water mixture experiment[J]. Journal of geophysical research: Solid earth, 2004, 109(B2):B02205.

[4] BAHR H A, HOFMANN M, WEISS H J, et al. Diameter of basalt columns derived from fracture mechanics bifurcation analysis[J]. Physical review E, 2009, 79(5):056103.

[5] GOEHRING L, MORRIS S W, LIN Z Q. Experimental investigation of the scaling of columnar joints[J]. Physical review E, 2006, 74(3):036115.

[6] MÜLLER G. Experimental simulation of basalt columns[J]. Journal of volcanology and geothermal research, 1998, 86(1/4):93-96.

[7] MÜLLER G. Starch columns: Analog model for basalt columns[J]. Journal of geophysical research: Solid earth, 1998, 103(B7):15239-15253.

[8] NISHIMOTO A, MIZUGUCHI T, KITSUNEZAKI S. Numerical study of drying process and columnar fracture process in granule-water mixtures[J]. Physical review E, 2007, 76(1):016102.

[9] CHRISTENSEN A, RAUFASTE C, MISZTAL M, et al. Scale selection in columnar jointing: Insights from experiments on cooling stearic acid and numerical simulations[J]. Journal of geophysical research: Solid earth, 2016, 121(3):1462-1482.

[10] 肖维民,邓荣贵,付小敏,等.单轴压缩条件下柱状节理岩体变形和强度各向异性模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(5):957-963.
XIAO Weimin, DENG Ronggui, FU Xiaomin, et al. Model experiments on deformation and strength anisotropy of columnar jointed rock masses under uniaxial compression[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2014, 33(5):957-963(in Chinese).

[11] 肖维民,邓荣贵,付小敏,等.模拟柱状节理岩体常规三轴压缩下变形和强度特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1):2817-2826.
XIAO Weimin, DENG Ronggui, FU Xiaomin, et al. Experimental study of deformation and strength properties of simulated columnar jointed rock masses under conventional triaxial compression[J].

Chinese journal of rock mechanics and engineering,2015,34(S1):2817-2826(in Chinese).

[12] JI H,ZHANG J C,XU W Y,et al. Experimental investigation of the anisotropic mechanical properties of a columnar jointed rock mass: Observations from laboratory-based physical modelling[J]. Rock mechanics and rock engineering,2017,50(7):1919-1931.

[13] XIA Y J,ZHANG C Q,ZHOU H,et al. Mechanical behavior of structurally reconstructed irregular columnar jointed rock mass using 3D printing[J]. Engineering geology,2020,268:105509.

[14] 崔臻,魏倩,侯靖,等. 基于节理网络有限元的柱状节理岩体等效变形模量结构效应研究[J]. 岩土力学,2016,37(10):2921-2928.
CUI Zhen,WEI Qian,HOU Jing,et al. Structural effect on equivalent modulus of deformation of columnar jointed rock mass with jointed finite element method[J]. Rock and soil mechanics,2016,37(10):2921-2928 (in Chinese).

[15] 郑文棠,徐卫亚,宁宇,等. 节理玄武岩体变形模量的尺寸效应和各向异性[J]. 工程地质学报,2010,18(4):559-565.
ZHENG Wentang,XU Weiya,NING Yu,et al. Scale effect and anisotropy of deformation modulus of closely jointed basaltic mass[J]. Journal of engineering geology,2010,18(4):559-565(in Chinese).

[16] 闫东旭,徐卫亚,王伟,等. 柱状节理岩体宏观等效弹性模量尺寸效应研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(2):243-250.
YAN Dongxu,XU Weiya,WANG Wei,et al. Research of size effect on equivalent elastic modulus of columnar jointed rock mass[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2012,34(2):243-250 (in Chinese).

[17] 郎颖娴. 基于 CT 数字图像的三维岩石细观孔隙模型与数值试验[D]. 大连:大连理工大学,2018.

[18] 郎颖娴,梁正召,段东,等. 基于 CT 试验的岩石细观孔隙模型重构与并行模拟[J]. 岩土力学,2019,40(3):1204-1212.
LANG Yingxian,LIANG Zhengzhao,DUAN Dong,et al. Three-dimensional parallel numerical simulation of porous rocks based on CT technology and digital image processing[J]. Rock and soil mechanics,2019,40(3):1204-1212(in Chinese).

[19] 于庆磊,杨天鸿,唐世斌,等. 基于 CT 的准脆性材料三维结构重建及应用研究[J]. 工程力学,2015,32(11):51-62.
YU Qinglei,YANG Tianhong,TANG Shibin,et al. The 3D reconstruction method for quasi-brittle material structure and application [J]. Engineering mechanics,2015,32(11):51-62(in Chinese).

[20] 梁正召. 三维条件下的岩石破裂过程分析及其数值试验方法研究[D]. 沈阳:东北大学,2005.

（编辑　史淑英）

